

大功率 LED 热阻自动测量方法研究

王小增, 杨久红

(嘉应学院, 广东 梅州 514015)

摘要: 在没有散热措施的情况下, 大功率 LED 芯片的温度迅速升高, 当结温超过最大允许温度时, 大功率 LED 会因过热而损坏; 大功率 LED 灯具设计中, 最主要的设计工作就是散热设计; 利用 LED 半导体器件的结电压与结温具有良好的线性关系的特性, 通过测量大功率 LED 工作时的正向压降、工作电流、恒温箱温度和热衬温度, 采用电学参数法, 实现了大功率 LED 热阻的自动测量; 设计并制作了大功率 LED 热阻自动测量仪, 快速、准确地测量了 LED 晶片到热衬的热阻; 6 种不同规格 LED 晶片到热衬的热阻测量值与计算值之间的误差小于 10%; 热阻测量值普遍高于理论计算值, 说明 LED 制造工艺水平还有很大的提升空间。

关键词: 大功率 LED; 热阻; 自动测量; 热衬温度

Method of Automatic Measurement of Thermal Resistance of High Power LED

Wang Xiaozeng, Yang Jiuhong

(Jiaying University, Meizhou 514015, China)

Abstract: In the absence of cooling measures, the wafer thermal of high power LED rises rapidly. When the junction thermal exceeds the maximum allowable thermal, the high power LED will be damaged due to overheating. In the design of high power LED lamps, the main work is to the thermal design. Using a good linear relationship characteristic of the semiconductor devices between the LED junction voltage and junction thermal, this paper measured the high-power LED working voltage, working current, thermal of the incubator and heat sink. Adopting the method of electrical parameters, the paper measure the thermal resistor of high power LED. The high-power LED thermal resistance measuring instrument is designed and made. The thermal resistance from the LED wafer to the heat sink is measured fast and accurately, and the error is less than 10%. The measured value of the thermal resistor is generally higher than the theoretical calculated value. It shows that the LED manufacturing technology level can be improved.

Keywords: high power LED; thermal resistor; automatic measurement; heat sink thermal

0 引言

大功率 LED 灯具工作过程中约有 15%~25% 的电能转换成光能, 大部分电能转换成热能释放出来, 提升了 LED 的温度。在没有散热措施的情况下, 大功率 LED 芯片的温度迅速升高, 当结温超过最大允许温度时, 大功率 LED 会因过热而损坏。因此在大功率 LED 灯具设计中, 最主要的设计工作就是散热设计。LED 的热阻通常由器件的尺寸、结构和材料决定, 能确定不同灯具结构是否合理, 评价其散热能力, 是 LED 灯具有的一项关键的性能指标^[1]。

研究表明 LED 产生的热阻与驱动电流、空气流速和环境温度等影响因素有关^[2]。LED 热阻的测量要克服这些因素的影响。基于电学测试的参考热阻测试方法有脉冲测量法, 已经被采用测量大功率 LED 的参考热阻^[3]。LED 热阻的理论计算通常假设 LED 封装的侧壁是绝热的, 底部被连接到热沉, 确定适用于各种边界条件的热阻计算的理论公式^[4]。电学测量方法是常用的实验测量方法, 通过系数定标与测量正向偏压可直接得到 LED 结温, 并通过公式计算 LED 的热阻^[5]。针对大电压 LED 器件, 实验室通常采用热光参数测试仪, 利用外部电压源供电, 实现对超过仪器量程的大电压 LED 器件的热阻测试^[6]。

目前大功率 LED 灯具工作温度和热阻的测试方法主要有:

收稿日期: 2014-09-19; 修回日期: 2014-10-17。

作者简介: 王小增(1973-), 男, 辽宁绥中人, 硕士, 副教授, 主要从事智能仪表与嵌入式系统方向的研究。

红外热像仪法、电学参数法、光谱法、光功率法等。实际使用中, 对于大多数 LED 应用单位最关心的是 LED 在工作过程中的结温以及 PN 结到焊点的热阻^[7-10]。现有文献对 LED 热阻的测量方法研究较多, 测试过程复杂, 自动化程度不高。在保证测试精度的前提下, 为提高 LED 灯具热阻测试效率, 本文利用 LED 半导体器件的结电压与结温具有良好的线性关系的特性, 通过测量大功率 LED 工作时的正向压降, 工作电流, 恒温箱温度和热衬温度, 采用的电学参数法, 利用设计并制作的大功率 LED 热阻自动测量仪, 实现了 LED 晶片到热衬的热阻的快速准确测量。

1 大功率 LED 热阻计算模型

热阻通常由器件的尺寸、结构和材料决定, 定义为热量传导通道上两个参考点之间的温度差与两点间热量传输速率的比值。

$$R_{th} = \frac{\Delta T}{q_x} \quad (1)$$

其中: R_{th} 为两个参考点的热阻, K/W; ΔT 为两点间的温度差, K; q_x 为两点间热量的传递速率, W。

大功率 LED 的结构如图 1 所示, 主要由晶片, 热衬和散热电路板构成。LED 的功率超过 1W 时, 产生的热量较大。大功率 LED 散热需要考虑的环节包括晶片 PN 结到外延层, 外延层到封装基板, 封装基板到外部冷却装置, 冷却装置到空气。传导是大功率 LED 主要的热传播方式。为提高导热效果, 各个导热环节需要采用导热率高的材料, 并提高对流散热。LED 晶片的 PN 结到环境的总热阻为 R_{thja} 。

$$R_{thja} = \frac{(T_j - T_a)}{P_D} \quad (2)$$

其中, T_j 为 PN 结温度, K; T_a 为环境温度, K; P_D 为 LED 消耗的功率, W。晶片 PN 结到环境的传热路径为 PN 结—热衬—铝基散热电路板—空气, 可简化为图 2 所示的串联热阻模型。晶片 PN 结到环境总热阻 R_{thja} 为其它 3 个串联热阻之和。

$$R_{thja} = R_{thjs} + R_{thsb} + R_{thba} \quad (3)$$

图 2 所示各热阻对应元件介于两个温度节点之间, R_{thjs} 为 PN 结到热衬的热阻, K/W, R_{thsb} 为热衬到散热电路板的热阻, K/W, R_{thba} 为散热电路板到环境的热阻, K/W。

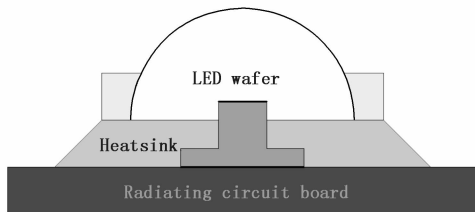


图 1 大功率 LED 的结构

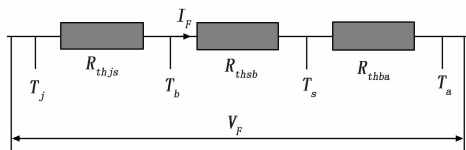


图 2 大功率 LED 的等效热阻

2 大功率 LED 热阻测量

2.1 理论依据

半导体材料的电导率具有热敏性, 改变温度可以显著改变半导体中的载流子的数量。禁带宽度通常随温度的升高而降低, 随温度的变化具有良好的线性关系。可以认为半导体器件的正向压降 ΔV_F 与结温 ΔT_j 之间是线性变化关系。

$$\Delta V_F = k \Delta T_j \quad (4)$$

其中: k 为正向压降随温度变化的系数。

则大功率 LED 晶片 PN 结到环境总热阻 R_{thja} 为:

$$R_{thja} = \frac{\Delta V_F}{k P_D} \quad (5)$$

P_D 为 LED 耗散功率, 按照 60%~70% 的电能转化为热能计算, 则

$$P_D = 0.65 \cdot I_F \times V_F \quad (6)$$

其中, I_F 为 LED 工作电流, A; V_F 为 LED 工作电压, V。

只要监测 LED 正向压降 V_F 的改变, 可以求出 k 值并确定其热阻。大功率 LED 热阻测试系统如图 3 所示。测试在温度控制精度为 1K 的恒温箱中进行, 电压精度 1 mV。图 3 中 R_1 为分流电阻, R_2 用来调整流经 LED 的电流大小, I_s 为恒流源。电流表测量流经 LED 的电流, 电压表测量 LED 两端的电压。

2.2 大功率 LED 热阻的测量方法

1) 测量 LED 温度系数 k 。将大功率 LED 置于温度为 T_a 的恒温箱中足够时间至热平衡, 即 $T_j = T_a$ 。用低电流 $I_F = 10$ mA 点亮 LED, 快速点测 LED 两端的电压 V_{F1} , 此时电流较小可以忽略 LED 产生热量的影响。接下来, 将 LED 置于温

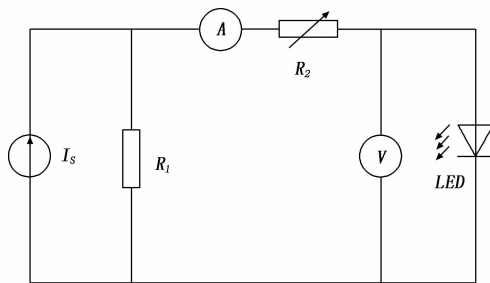


图 3 大功率 LED 热阻测量原理

度为 T_a' (此时, $T_a' > T_a$) 的恒温箱中足够时间, 至热平衡, 即 $T_{j2} = T_a'$ 。测量 LED 两端的电压 V_{F2} 。则 LED 温度系数

$$k = \frac{(V_{F2} - V_{F1})}{(T_a' - T_a)} \quad (7)$$

2) 测量 LED 在额定电功率状态下 V_F 的变化。将 LED 置于温度为 T_a 的恒温箱中, 给 LED 输入电功率 P_d , 使其自加热。维持 LED 工作电流 I_F 恒定, 并保持足够长的时间, 至 LED 工作热平衡, 此时 V_F 达到稳定, 记录此时 LED 的 I_F 和 V_F 。测量 LED 热沉温度 T_s , 取最大值。立即减少 LED 电流到 10 mA, 测量 LED 两端的电压 V_{F3} 。

3) 数据处理。两个 LED 的 PN 结温度下的电压差值为: $\Delta V_F = V_{F3} - V_{F1}$ 。耗散功率 $P_D = 0.65 I_F \times V_F$, 则 LED 晶片 PN 结到环境总热阻:

$$R_{thja} = \frac{\Delta V_F}{k P_D} \quad (8)$$

热衬到散热电路板的热阻:

$$R_{thsa} = \frac{(T_s - T_a)}{P_D} \quad (9)$$

晶片 PN 结到热衬的热阻:

$$R_{thjs} = R_{thja} - R_{thsa} \quad (10)$$

3 大功率 LED 热阻自动测量仪

3.1 大功率 LED 热阻自动测量仪组成

测量大功率 LED 热阻需要测量多个物理量, 耗时较多, 不利于热阻的快速测量。根据大功率 LED 热阻的测量方法和步骤, 设计的大功率 LED 热阻自动测量仪如图 4 所示。包括控制 LED 电流的继电器, 测量 LED 电流的电流传感器, 测量 LED 电压的 AD 转换器, 控制恒温箱温度的 PT100-2 传感器和固态继电器 SSR, 测量 LED 结温的 PT100-1 传感器, 二个温度变速器, 数据采集板卡和上位控制计算机。

3.2 大功率 LED 热阻自动测量仪工作原理

大功率 LED 热阻自动测量仪采用数据采集板卡的 IO 口控制继电器和固态继电器 SSR 的通断, 用 AD 口检测 LED 的工作电流和工作电压, 以及 LED 热衬温度和恒温箱的温度。数据采集板卡的控制信号来自上位计算机的应用程序, 采集到的 LED 热衬和恒温箱的温度、LED 的工作电压和电流数据通过计算机和板卡的数据接口送到计算机上运行的应用程序当中, 计算机应用程序采用公式 (7) - (8) 计算大功率 LED 晶片 PN 结到热衬的热阻。

LED 芯片的 PN 结到热衬的热阻测量过程中, LED 驱动电流和工作时的环境温度控制多采用人工切换。大功率 LED 热阻自动测量仪 LED 驱动电流采用继电器切换, 由数据采集卡的 IO1 口控制。恒温箱温度由温度传感器 PT100-2 和固态

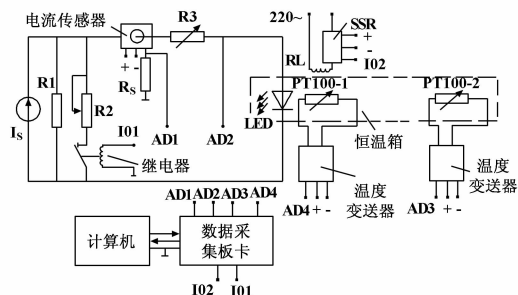


图 4 大功率 LED 热阻自动测量仪原理图

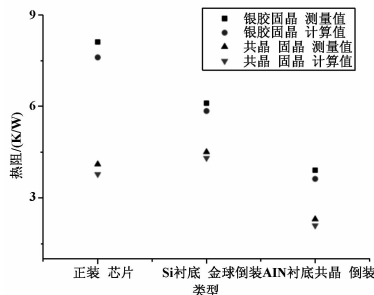


图 5 LED PN 结到热衬的热阻的实测值和计算值

继电器 SSR 控制, 采用 PID 温度控制算法, 超调小于 5%, 精度 ±1 °C, 温度控制最大值 200 °C。由温度传感器 PT100-1 测量 LED 热衬温度。温度数据分别经数据采集卡的 AD3 和 AD4 送到上位计算机应用程序中。LED 的工作电流和电压通过数据采集卡的 AD1 和 AD2 送到上位计算机应用程序中, 进行 LED 芯片的 PN 结到热衬的热阻的计算。

3.3 大功率 LED 热阻自动测量仪使用方法

大功率 LED 热阻自动测量仪使用方法如下, 数据采集卡 IO2 端输出信号控制固态继电器 SSR 工作, 加热恒温箱到温度 T_0 。通过 PT100 温度传感器检测并控制温度。数据采集卡 IO1 端控制控制继电器触点闭合, 10 mA 小电流通过 LED, 采用数据采集卡模数转换接口 AD1 检测流经 LED 的电流。将 LED 置于恒温箱中, 采用数据采集卡模数转换接口 AD2 端, 测量 T_0 温度下通过 10 mA 小电流时 LED 压降 V_{F1} 。数据采集卡 IO2 端控制固态继电器 SSR 工作, 加热恒温箱到温度 T'_0 。通过 PT100-2 温度传感器检测温度, 控制恒温。维持一段时间, 测量 T'_0 温度下通过 10 mA 小电流时 LED 压降 V_{F2} 。利用公式 (7) 计算 LED 的温度系数 k 。

数据采集卡 IO1 端控制控制继电器触电断开, 额定电流通过 LED, 并通过数据采集板卡的 AD1 端检测。LED 两端电压为 V_F , LED 自加热, 并用 PT100-1 温度传感器测量 LED 热衬温度 T_s 。采用数据采集卡模数转换接口 AD4 检测并送到上位计算机。数据采集卡 IO1 端控制控制继电器触点闭合, 减少 LED 电流到 10 mA, 立即测量 LED 的压降 V_{F3} 。利用公式 (7)、(8) 和 (9) 计算晶片 PN 结到环境总热阻, 热衬到散热电路板的热阻和晶片 PN 结到热衬的热阻。

4 大功率 LED 热阻实测

以 Emitter 公司生产的芯片尺寸为 1 mm×1 mm 的 1W 大功率 LED 为例, 考虑主导热通道的影响, 实测银胶固晶和共晶固晶的正装, Si 衬底金球倒装的 AlN 衬底共晶倒装 6 种规格的 LED 芯片的 PN 结到热衬的热阻。采用本文设计的自动 LED 热阻检测仪实测, LED 芯片的 PN 结到热衬的热阻测量值和计算值关系如图 5 所示, 误差小于 10%。

LED 芯片的 PN 结到热衬的热阻的实验和计算结果说明固晶工艺对热阻的等效有较大影响, 共晶固井工艺下 LED 的热阻小于银胶固晶的。银胶固晶工艺下倒装芯片在热阻指标上要优于正装芯片的。正装芯片共晶固晶热阻较小。LED 的 PN 结到热衬的热阻的实测值普遍大于计算数值, 原因之一是理论计算模型有未考虑的影响 LED 热阻的因素, 二是说明 LED 制造工艺水平还有很大的提升空间。

5 结论

利用 LED 半导体器件的结电压与结温具有良好的线性关系的特性, 通过测量大功率 LED 工作时的正向压降, 工作电流, 恒温箱温度和热衬温度, 采用的电学参数法, 实现了大功率 LED 热阻的自动测量。设计并制作了大功率 LED 热阻自动测量仪, 实现了 LED 晶片到热衬的热阻的快速准确测量。六种不同规格 LED 晶片到热衬的热阻测量值与计算值之间的误差小于 10%。热阻测量值普遍高于理论计算值, 说明 LED 制造工艺水平还有很大的提升空间。

参考文献:

- [1] 刘雨鑫, 刘诗斌, 荣皖芳. 一种用于白光 LED 亮度控制电路 [J]. 计算机测量与控制, 2009, 17 (3): 555-557.
- [2] 张建新, 武志刚, 李松宇, 等. LED 散热模块热阻测量实验系统开发 [J]. 实验技术与管理, 2013, 30 (1): 77-81.
- [3] 王伟, 王万良, 潘建根, 等. 大功率 LED 参考热阻测试系统研究与分析 [J]. 液晶与显示, 2009, 24 (2): 294-298.
- [4] Ma Z L, Zheng X R. Thermal Resistance Calculation Method of High-power LEDs [J]. Sci. Tech. Engng., 2007, 24 (7): 6416-6419.
- [5] 韩凯, 刘木清. 大功率 LED 热阻测量研究 [J]. 复旦学报 (自然科学版), 2011, 50 (2): 139-145.
- [6] 陈国龙, 雷瑞瑞, 陈焕庭, 等. 负偏压法测试大电压 LED 器件热阻 [J]. 实验技术与管理, 2012, 29 (4): 48-52.
- [7] 李炳乾, 布良基, 范广涵. 功率型 LED 热阻测量的新方法 [J]. 半导体光电, 2003, 24 (1): 22-24.
- [8] 宋国华, 缪建文, 方靖淮, 等. 基于热敏电阻的发光二极管热阻测量 [J]. 半导体光电, 2007, 28 (10): 633-636.
- [9] 陈国龙, 朱丽虹, 郭自泉, 等. 外部电压源法测试大电压 LED 器件/模块热阻 [J]. 实验技术与管理, 2013, 30 (7): 29-32.
- [10] 肖炜, 刘一兵. 一种测量功率型 LED 热阻的方法 [J]. 低温与超导, 2011, 39 (6): 80-82.

更正

2015 年 3 期文章《国外武器装备电磁环境适应性试验与评价技术及能力发展综述》中, 修改作者如下:

张宝珍, 张丽星, 刘晨宇。